



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

⑧7 EP 0 203 530 B1

⑩ DE 36 50 220 T 2

⑤1 Int. Cl.<sup>8</sup>:  
**G 01 J 9/00**  
G 01 N 11/02  
G 02 B 23/00

②1 Deutsches Aktenzeichen:	36 50 220.0
⑧6 Europäisches Aktenzeichen:	86 106 964.9
⑧6 Europäischer Anmeldetag:	22. 5. 86
⑧7 Erstveröffentlichung durch das EPA:	3. 12. 86
⑧7 Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA:	1. 2. 95
④7 Veröffentlichungstag im Patentblatt:	22. 6. 95

③0 Unionspriorität: ③2 ③3 ③1

22.05.85 US 736933

⑦3 Patentinhaber:

Adaptive Optics Associates Inc., Cambridge, Mass.,  
US

⑦4 Vertreter:

Kuhnen, R., Dipl.-Ing.; Wacker, P., Dipl.-Ing.  
Dipl.-Wirtsch.-Ing.; Fűrniß, P., Dipl.-Chem.  
Dr.rer.nat., Pat.-Anwälte; Hübner, H., Dipl.-Ing.,  
Rechtsanw.; Röß, W., Dipl.-Ing.Univ.; Kaiser, J.,  
Dipl.-Chem.Univ.Dr.rer.nat.; Brandl, F., Dipl.-Phys.,  
Pat.-Anwälte, 85354 Freising

⑧4 Benannte Vertragsstaaten:

AT, BE, CH, DE, FR, GB, IT, LI, LU, NL, SE

⑦2 Erfinder:

Wirth, Allan, Bedford Mass. 01730, US; Feinleib,  
Julius, Cambridge Mass. 02140, US; Schmutz,  
Lawrence E., Watertown Mass. 02172, US; Rapkine,  
Douglas H., Somerville Mass. 02145, US; Dillon,  
Robert F., Belmont Mass. 02178, US; Hizny, John J.,  
North Billerica Mass. 01862, US

⑤4 Vorrichtung zur Abtastung einer optischen Wellenfront.

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patentamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 36 50 220 T 2

DE 36 50 220 T 2



## Beschreibung

### Technisches Gebiet

5 Die vorliegende Erfindung liegt auf dem Gebiet adaptiver optischer Systeme und bezieht sich im einzelnen auf eine Einrichtung zur Feststellung von Wellenfrontverzerrungen in einem Lichtstrahl.

### Technischer Hintergrund

10 Adaptive optische Systeme sind konstruiert worden, um die Auflösung zu verbessern, indem Verzerrungen, welche durch atmosphärische Störeinflüsse und die Unvollkommenheiten des empfangenden optischen Systems in Lichtwellenfronten eingeführt worden sind, zu korrigieren. Diese adaptiven optischen Systeme sind entweder Systeme mit abgehender modulierter Welle oder Meßsysteme für die rückkehrende Wellenfront.

20 Ein wesentliches Element solcher adaptiver optischer Systeme ist der Wellenfrontfühler, welcher eine Wellenfrontverzerrung feststellt.

25 Eine phasenempfindliche Art eines Wellenfrontfühlers ist das Scherungsinterferometer, welches von Hardy u. a. entwickelt worden ist, siehe "Real-time Atmospheric Compensation", J. Opt. Soc. Amer. 67, 360, 1977. Bei dieser Art eines Systems wird die Eingangswellenfront durch eine seitlich versetzte oder eingescherte Wiederholung ihrer selbst überlagert. Die Einscherung wird durch eine Gruppe rotierender Übertragungsgitter erreicht, wobei die Interferenz zwischen der Beugungsordnung Null (nicht eingeschert) und  $\pm$  1 (eingeschert) verwendet wird. Die Drehung des Gitters führt zu einer Wechselmodulation der Interferenzbänder an jedem Punkt der Blendenöffnung. Da die Interferenzbänder



zwischen verschiedenen Kombinationen von Ordnungen mit unterschiedlichen Vielfachen der Modulationsgrundfrequenz moduliert sind, können die gewünschten Interferenzterme nach dem Detektieren elektronisch getrennt werden. Dieses System verwendet radiale rotierende Gitter, so daß der Verschneidungsabstand durch Bewegen des Gitterzentrums auf die Brennebene hin oder von ihr weg erhöht oder verringert werden kann.

Das Gitter besteht aus einer Glas-Kreisscheibe mit einander abwechselnd klaren und undurchsichtigen Radiallinien, die sich von der Mitte zum Außenrand erstrecken und eine rechteckwellenförmige Durchlässigkeitsamplitude an jedem Radius ergeben.

Die Information, welche durch das Scherungsinterferometer von Hardy u. a. geliefert wird, ist eine Gruppe von örtlichen Phasendifferenzen zwischen Punkten in der Blendenöffnungsebene, welche durch den Verschneidungsabstand getrennt sind. Durch Messen dieser Phasendifferenzen in zwei Dimensionen unter Verwendung eines Satzes von x- und y-Detektorreihen kann die gesamte Blendenöffnung abgetastet und die Eingangswellenfront näherungsweise berechnet werden.

Ein Nachteil dieses Systems besteht darin, daß es einzig Phasendifferenzen nur innerhalb einer Welle der Neigung zwischen Punkten in der Blendenöffnungsebene bestimmt, die durch den Verschneidungsabstand getrennt sind. Größere Neigungen werden als solche festgestellt, die Werte von weniger als einer vollen Welle haben. Dies führt zu einer sogenannten  $2\pi$ -Mehrdeutigkeit, welche auf der periodischen Natur der Amplitudendifferenzen beruht, die durch Phasendifferenzen in den zwei überlagerten Wellenfronten erzeugt werden. Diese  $2\pi$ -Mehrdeutigkeit kann als eine Grenze bezüglich des dynamischen Bereiches des Scherungsinterferometers als eine Wellenfront-Fühlereinrichtung betrachtet werden.



Dies hat seinen Grund darin, daß Phasendifferenzen von mehr als einer Welle zwischen benachbarten Subaperturen nicht richtig detektiert werden.

5        Es existiert ein weiteres Problem mit dem Gitter, das  
den detektierten Signalen einen Wechselstromträger auf-  
prägt. Wenn die Größe des Objektes so beträchtlich ist, daß  
sein Bild auf dem rotierenden Gitter den Gitterabstand  
10       überschreitet, so muß die Einscherung durch Neueinstellung  
der rotierenden Gitter vergrößert werden. In solchen Fällen  
kann die erforderliche Information zum Erhalt der richtigen  
Einscherung nur aus gewissen äußeren Messungen der Objekt-  
größe erhalten werden.

15       Eine andere Art einer Wellenfront-Fühlereinrichtung ist  
die Hartmann-Fühlereinrichtung, welche in "Integrated Ima-  
ging Irradiance ( $I^3$ ) Sensor, A Method for Real-Time Wave-  
front Mensuration", SPIE Band 179, Adaptive Optical Compo-  
nents II, 1979, S. 27" beschrieben worden ist. Diese Art  
20       von Fühlereinrichtung vermeidet das  $2\pi$ -Mehrdeutigkeitspro-  
blem des Scherungsinterferometers von Hardy u. a. Bei der  
Hartmann-Bauart der Fühlereinrichtung ist die Blendenöff-  
nung in Subaperturen unterteilt, welche jeweils auf einen  
x-y-Stellungsfühler abgebildet werden, beispielsweise einen  
25       Quadrantdetektor oder "quad cell"-Bauteil. Die Verlagerung  
jedes Punktes von seiner Mittelstellung ergibt die durch-  
schnittliche Wellenfrontneigung an seiner jeweiligen Sub-  
apertur. Eine derartige Anordnung gestattet die Messung  
vieler Wellen der Neigung ohne Mehrdeutigkeit.

30       Unglücklicherweise ist die charakteristische Einfach-  
heit der Hartmann-Type der Fühlereinrichtung in der grund-  
sätzlichen Form von verschiedenen praktischen Problemen be-  
gleitet:

35       1. Zwischen der Blendenöffnungsoptik und der Detektorrei-  
henanordnung muß eine extrem gute Ausrichtungsgenauig-



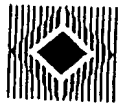
keit aufrechterhalten werden, da jede Punktverlagerung einen Eingangswellenfront-Fehler bedeutet.

2. Das System ist im wesentlichen ein Gleichstromsystem und erfordert einen äußeren Zerkhacker mit seiner ihn begleitenden Uneffektivität, für einen Wechselstrombetrieb.

3. Als quasi zentrisches Meßsystem hat die Hartmann-Fühlereinrichtung eine beträchtliche Empfindlichkeit bezüglich Größe und Gestalt des Subapertur-Punktes, d.h. bezüglich Wellenfrontverzerrungen höherer Ordnung.

Demzufolge wurde die in dem US-Patent Nr. 4,141,652 beschriebene integrierend abbildende Fühlereinrichtung ( $I^3$ -Fühlereinrichtung) entwickelt, um einige der Probleme zu beseitigen, welche bei der Fühlereinrichtung der Hartmann-Type angetroffen werden.

In der  $I^3$ -Fühlereinrichtung nach dem US-Patent Nr. 4,141,652 (in Fig. 2 gezeigt und dort mit "Prior Art" beschriftet) wird ein modulierter Bezugsstrahl 9 von einem Laser 6 mit einem ankommenden Lichtstrahl 8 kombiniert. Der kombinierte Strahl 7 kann nach Wunsch eine Nutationsbewegung ausführen, um ein detektierbares Wechselstromsignal zu erzeugen. Der kombinierte Strahl wird dann durch ein Subapertur-Aufteilungsbauteil, beispielsweise ein Prisma 110 in eine Mehrzahl von Strahlen 19 aufgeteilt und durch eine Reihenanzordnung 104 von Photodetektorzellen detektiert, um die Lage sowohl des ankommenden Strahles als des Bezugsstrahles zu messen. Der Unterschied zwischen der relativen Stellung des ankommenden Strahles und des Bezugsstrahles ist ein Maß für die Verzerrung oder die Neigung der Strahlwellenfront in dem System und dient zur Erzeugung eines Signales, um die Verzerrung zu kompensieren.



Die Verwendung der I<sup>3</sup>-Fühlereinrichtung für große Kom-  
pensationssysteme mit 200 oder mehr Subaperturen ist teil-  
weise durch die Kosten und die Kompliziertheit beschränkt,  
welche mit der erforderlichen digitalen Verarbeitung in Zu-  
sammenhang steht, um den analogen Ausgang der I<sup>3</sup>-Fühlerein-  
richtung in digitale Form umzusetzen und die erforderlichen  
Rechnungen zur Bestimmung der Wellenfrontneigung oder -  
aberration durchzuführen. Bei einer I<sup>3</sup>-Fühlereinrichtung  
sind beispielsweise 25 digitale Additionsschritte und 25  
digitale Multiplikationsschritte sowie zwei Divisions-  
schritte für jede Subapertur zur Errechnung der Wellen-  
frontneigung notwendig.

In dem Bestreben, die vorgenannten Beschränkungen der  
I<sup>3</sup>-Fühlereinrichtung zu vermeiden, wurde ein adaptives op-  
tisches System entwickelt, das für die Verwendung in großen  
Kompensationssystemen geeigneter erscheint und in dem US-  
Patent 4,399,356 (Feinleib u. a.), erteilt am 16. August  
1983, beschrieben ist. Das optische System in dem Patent  
4,399,356 ist im wesentlichen identisch mit dem der I<sup>3</sup>-Füh-  
lereinrichtung bis zu dem Punkt, an dem der kombinierte  
Strahl 7 von dem Spiegel 12 fokussiert wird. Dies kann man  
durch Vergleich von Fig. 2 (der I<sup>3</sup>-Fühlereinrichtung nach  
dem Stande der Technik) mit Fig. 3, der Fühlereinrichtung  
aus dem Patent 4,399,356 nach dem Stande der Technik erken-  
nen. Der Punkt der Abweichung tritt in Fig. 3 dort auf, wo  
der kombinierte Strahl an der Spitze des Prismas 110' fo-  
kussiert wird. Im Gegensatz hierzu kann man sehen, daß in  
Fig. 2 der kombinierte Strahl nicht fokussiert wird, son-  
dern auf alle Seiten des reflektierenden Prismas 110 auf-  
trifft, welches den Lichtstrahl in getrennte Strahlen  
teilt, wobei jeder reflektierte Strahl zu einem Brennpunkt  
auf jeweiligen Detektoren in der Reihenanordnung 104 kommt.

Die Tatsache, daß jeder Strahl zu einem Brennpunkt auf  
einem einzelnen Detektor verläuft, nachdem er durch das  
Prisma 110 abgeteilt ist, bedeutet, daß der fokussierte



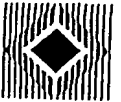
Strahl durch Streuung aufgeweitet wird, da die Apertur dieses Strahles kleiner als die Apertur der vollen Blendenöffnung ist.

5       Andererseits wird in der Wellenfront-Fühlereinrichtung nach dem Patent 4,399,356 (wie in Fig. 3 gezeigt) unabhängig davon, wieviele Subaperturelemente erforderlich sind, der kombinierte Strahl nur auf einen Punkt fokussiert, nämlich die Spitze des Prismas 110'. Somit wird der kombinierte Strahl von der vollen Eingangsapertur zu dem System fokussiert, bevor irgendeine Aufteilung in Subaperturen erfolgt. Die Aufweitung durch Streuung ist daher bedeutend geringer, so daß die Neigungsmessung genauer wird.

15       Selbst bei der Wellenfront-Fühlereinrichtung nach dem Patent 4,399,356 ist aber eine große Zahl digitaler arithmetischer Schritte je Subapertur für die Messung der Wellenfrontneigung erforderlich. Beispielsweise benötigt die Einrichtung nach dem Patent 4,399,356 32 Additionsschritte und zwei Divisionsschritte je Subapertur.

25       Sowohl bei der I<sup>3</sup>-Wellenfront-Fühlereinrichtung als auch bei der Einrichtung nach dem Patent 4,399,356 wird die Intensität des Subapertur-Lichtpunktes von einer Subapertur für eine geneigte Wellenfront durch die Subapertur-Detektoren in der Reihenanzordnung 104, Fig. 2, oder der Reihenanzordnungen 4a-c, Fig. 3, aufgenommen und in Digitalsignale umgeformt und verarbeitet, um den Fleckenschwerpunkt zu bestimmen, nämlich den Punkt des Fleckens, welcher das gewogene Mittel der Fleckenintensität ist.

35       Die Schwerpunkterrechnung kann in einer Reihe von Weisen erfolgen. Eine typische Art und Weise erfordert die Anwendung koordinatenabhängiger Gewichtungen, welche durch einen gewichteten Pixel-Algorithmus (WPA) definiert sind, um die Pixel-Intensitätssignale zu digitalisieren und das Summieren der gewichteten Intensitäten. Das Gewichten kann



als eine Multiplikation der digitalisierten Pixel-Intensitätssignale mit einer Reihe von konstanten Gewichtungen angesehen werden. Die Summe der gewichteten Intensitäten wird durch die Summe der ungewichteten Intensitäten dividiert,  
5 um den Schwerpunkt des Fleckens zu erhalten.

Sowohl der  $I^3$ -Fühler als auch der Fühler nach dem Patent 4,399,556 sind also durch die Notwendigkeit einer digitalen Durchführung der Schwerpunktberechnung begrenzt.  
10 Für eine Wellenfront-Fühlereinrichtung mit hunderten oder gar tausenden von Subaperturen kann diese Rechnung mit der erforderlichen Geschwindigkeit durch dem Stande der Technik angehörende Prozessoren unter Verwendung einigermaßen gebräuchlicher digitaler Technologie durchgeführt werden.  
15 Dort jedoch, wo bemerkenswert größere Wellenfront-Fühlereinrichtungen benötigt werden, wird der Verarbeitungsaufwand für die digitale Schwerpunktberechnung erdrückend.

Zusätzlich verwenden beide Systeme nach dem Stande der Technik viele Detektorelemente je Subapertur. Da ein fester Störpegel mit jedem Element verbunden ist, ergibt sich ein beträchtlicher Störungsnachteil durch die Verwendung von mehrfachen Detektoren. Weiter ergibt sich in jedem Fühlersystem, das die Photonen in dem Eingangsstrahl zwischen  
20 verschiedenen Detektoren aufteilt, ein schwerwiegender und unvermeidbarer Störungsnachteil. Dies beruht auf dem erhöhten Photonen-Einschlagrauschen in den aufgeteilten Strahlen. Jedesmal wird auch die Zahl der Photonen in einem Strahl proportional zu der Quadratwurzel der Verminderung  
25 der Strahlintensität vermindert.  
30

Weiter ist es aus dem US-Patent 4,472,029 bekannt, einen Bildinformationsverstärker zwischen einen Strahlaufteiler und Abbildungsmitteln eines integrierten Wellenfront-Kompensators anzuordnen. Der Bildinformations-Verstärker  
35 empfängt ein Muster von Lichtpunkten von fokussierten Subapertur-Lichtstrahlen und formt dieses Lichtmuster in ein





verstärktes elektronisches Ladungsmuster um, von welchem elektrische Signale zur Betätigung eines monolithischen piezoelektrischen Spiegels abgeleitet werden. Dieser Wellenfrontkompensator nach dem Stande der Technik ist durch die

5 Beschränkungen des aktiven Spiegels zur Korrektur von Wellenfrontverzerrungen seinerseits beschränkt.

Demgemäß besteht Bedarf an einem Wellenfront-Fühlersystem, bei welchem die Wellenfrontabweichungskorrektur ohne

10 die Notwendigkeit übermäßig großer digitaler Verarbeitungsrechnungen erreicht werden kann und bei welchem die Signal-/Rauschqualität nahe an der Grenze des Photoneneinschlagrauschens des unaufgeteilten Eingangsstrahles liegt.

15 Es besteht außerdem Bedarf an einem Wellenfront-Fühlersystem zur Korrektur von Wellenfrontabweichungen mit hoher Auflösung, Präzision und Geschwindigkeit.

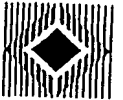
#### Offenbarung der Erfindung

20 Die oben angegebenen Ziele werden gemäß der vorliegenden Erfindung durch eine optische Wellenfront-Fühlereinrichtung mit den Merkmalen von Anspruch 1 erreicht. Bevorzugte Ausführungsformen und Weiterentwicklungen einer solchen Fühlereinrichtung sind in den Unteransprüchen 2 bis 19

25 gekennzeichnet. Die zuvor erwähnten Ziele werden auch durch ein Verfahren erreicht, das in Anspruch 20 gekennzeichnet ist.

30 Im einzelnen wird eine ankommende Lichtwellenfront zuerst in eine Anzahl von Subaperturen aufgeteilt und die Lichtflecken von jeder Subapertur werden intensiviert. Sind die Fleckenbilder einmal intensiviert, so kann das resultierende Licht zwischen Detektoren aufgeteilt werden, über

35 eine große Fläche verteilt werden oder teilweise in optischen Filtern absorbiert werden, ohne daß man zu einem Nachteil im Photoneneinschlagrauschen kommt. Dies beruht



darauf, daß der Photon/Photon-Gewinn des Verstärkers so groß gemacht werden kann, daß selbst in den aufgeteilten Strahlen der Photonenfluß in starkem Maße denjenigen in dem Eingangsstrahl übersteigt.

5

Diese intensivierten Flecken werden auf einer Zelle einer analogen Filterreihe abgebildet. Diese Filterreihe codiert eine vorbestimmte Funktion der Lichtflecken-Intensitätsverteilung auf die Intensität des Strahles, der von der Filterreihe übertragen wird.

10

In der bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist die Filterreihe eine zweidimensionale Maske, welche so viele Maskenzellen aufweist, wie Subaperturen vorhanden sind. Die Lichtübertragungseigenschaft jeder Maskenzelle verändert sich linear mit der Position. Die ausgesendete Intensität von jedem Subaperturflecken wird also durch die linearen Durchlässigkeits-eigenschaften der Zelle gewichtet oder codiert, wenn das Licht von jeder Subapertur durch die Maske tritt. Für eine gegebene Intensität des Subaperturfleckens ist die Ausgangsintensität von dem Maskenfilter, wie sie von dem Detektor festgestellt wird, proportional zu der Position des Fleckens auf dem Filter. Eine Summierung wird durch Verwendung eines einzigen photoempfindlichen Detektors für den gesamten Maskenausgang erreicht, welcher die festgestellte Pixel-Intensität über die gesamte Fläche der Maske integriert.

15

20

25

Zwischen dem Bildverstärker und der Filterreihen-anordnung ist ein Strahlaufteiler vorgesehen, um einen Teil des unterteilten und intensivierten Strahles auf einen Bezugsdetektor zu reflektieren. Der Intensitätsausgang der Wellenfront-Fühlereinrichtung wird mit der Eingangsintensität verglichen, wie sie von dem Bezugsdetektor gemessen wird, um ein Ausgangs-Wellenfrontmeßsignal unabhängig von der Eingangsintensität zu erzeugen. Nachdem das Verhältnis in den intensivierten Strahlen gemessen wird, können sowohl

30

35



die Positionsgenauigkeit als auch der dynamische Bereich der Fühlereinrichtung durch Vergrößerung des Verstärkungsgewinns vergrößert werden. Das erzielbare Signal-/Rauschverhältnis in der Wellenfrontmessung ist nur durch  
5 das Photoneneinschlagrauschen im Eingangsstrahl begrenzt. Es wird also ein Verhältniswert erzeugt aus der Intensität des durch den Filter übertragenen Lichtes zu der Intensität zu dem Filter hin. Dieser Verhältniswert wird digital errechnet, wobei die digitalisierten Signale von den beiden  
10 Detektoren verwendet werden. Dieses Verhältnis ändert sich in Abhängigkeit von einer Fleckenbewegung, welche ihrerseits sich mit der Wellenfrontneigung ändert und daher als Maß für eine solche Neigung verwendet werden kann.

15 Es sei bemerkt, daß in den Systemen nach dem Stande der Technik das Verhältnis von gewichteten und ungewichteten Summen auch in dem digitalen Prozessor berechnet werden muß. Im vorliegenden System ist diese Verhältnisrechnung die gesamte digitale Verarbeitung, die je Subapertur notwendig ist.  
20

#### Kurze Beschreibung der Zeichnungen

25 Fig. 1 ist eine vereinfachte, teilweise perspektivische schematische Ansicht einer verbesserten Wellenfront-Fühlereinrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung mit einer vergrößerten Ansicht einer Zelle 100 der Filterreihe 10.

30 Fig. 2 ist eine perspektivische Ansicht der I<sup>3</sup>-Fühlereinrichtung nach dem Stande der Technik gemäß Fig. 6 des US-Patentes 4,141,652.

35 Fig. 3 ist eine perspektivische Ansicht der Wellenfront-Fühlereinrichtung nach dem Stande der Technik entsprechend Fig. 1 des US-Patentes 4,399,356.



Fig. 4 ist eine Frontansicht einer Filterzelle 100 gemäß der Erfindung.

5

Fig. 5 ist eine Frontansicht einer Filterreihe 10 entsprechend der vorliegenden Erfindung.

Fig. 6 ist eine Schemaskizze eines Prüfsystems zur Simulation der Erfindung.

10

Fig. 7A bis 7E zeigen alternative Formen von Filterzellen.

15

Fig. 8 ist ein Diagramm des Ausgangs der Wellenfront-Fühlereinrichtung abhängig von der Fleckposition für einen Prototyp der Filterreihenordnung.

Fig. 9 ist eine Schemaskizze einer Doppel-Wellenfront-Fühlereinrichtung gemäß der Erfindung.

20

Fig. 9A ist eine Frontansicht in Richtung der Linien 9-9 von Fig. 9 gesehen.

25

Fig. 10 stellt eine alternative Ausführungsform einer zweiachsigen Wellenfront-Fühlereinrichtung dar.

Fig. 11 ist eine weitere alternative Ausführungsform einer Filtermaske, welche unterschiedlich gefärbte Maskenstreifen verwendet.

30

Fig. 12 ist eine schematische Darstellung zur Verdeutlichung der Verwendung der Maske von Fig. 11.

35

Fig. 13 ist eine Teil-Aufsicht auf eine Filtermaskenzelle 100G, bei welcher die Durchlässigkeitseigenschaften veränderbar sind.



Fig. 14 ist eine schematische Schnittansicht einer Ausführungsform der Erfindung, bei welcher die Filterreihenordnung in den Schirm eines Bildverstärkers eingebaut ist.

5

Fig. 15 ist eine Aufsicht auf die leitfähige Schirmmaske von Fig. 14.

### Beste Art der Ausführung der Erfindung

10

#### I. Wellenfront-Fühlersystem

Eine bevorzugte Ausführungsform der Erfindung wird nun in Verbindung mit Fig. 1 der Zeichnungen beschrieben.

15

In Fig. 1 ist ein Lichtstrahl 8 gezeigt, welcher in das optische System eintritt. Der Lichtstrahl 8 kann eine Wellenfront des Lichtes sein, das von einem entfernten Objekt ausgeht, beispielsweise einem Satelliten oder Stern, oder kann das Licht sein, das von einem Objekt reflektiert wird, das durch eine Quelle beleuchtet wird, die sich in der Nähe der Einrichtung von Fig. 1 befindet.

Nach Wunsch kann der Strahl 8 in einem Strahlkombinierer 2 mit einem Bezugslichtstrahl 9 von einem Laser 6 kombiniert werden. Der gegebenenfalls vorgesehene Bezugsstrahl 9 ist vorzugsweise eine amplitudenmodulierte Ebene oder kugelige Wellenfront, welche von einer Laserquelle emittiert wird, welche von einem akustisch-optischen Modulator (nicht dargestellt) moduliert ist.

30

Der Bezugsstrahl 9 führt zu einem optischen und elektronischen Selbsteichungsverhalten für Wellenfront-Neigungsmessungen.

35

Die Aufgabe des Systems nach Fig. 1 ist es, die Gestalt der optischen Wellenfront des Strahles 8 mit verhältnismä-



Big hohen Geschwindigkeiten nahe Echtzeit festzustellen. Ist einmal die Feststellung erfolgt, so können die Messungen dazu verwendet werden, vor der Abbildung des Strahles die Wellenfront bezüglich atmosphärischer Abweichungen oder  
5 anderer unerwünschter Störungen zu korrigieren, wie dies im US-Patent 4,399,356 beschrieben ist.

Der kombinierte Strahl 7 von dem Strahlkombinierer 2 wird auf eine Gruppe 12 von kleinen Linsen abgebildet, welche eine zweidimensionale Reihenanordnung einzelner Linsen  
10 umfassen kann, welche den Strahl 7 in eine Anzahl von Subapertur-Strahlen 120 aufteilen, die auf einen Bildverstärker 4 fokussiert werden und darauf eine Anzahl von Lichtflecken bilden. Der Bildverstärker 4 verstärkt die Intensität jedes Subapertur-Fleckens, der auf die Vorderseite des  
15 Verstärkers auftrifft. Die verstärkten Subaperturbilder werden durch den Kollimator 14 kollimiert und durch ein Linsensystem 18 auf die einzelnen Zellen 100 der Filterreihenanordnung 10 fokussiert.

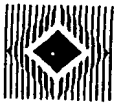
20 Ein wichtiger Gesichtspunkt der vorliegenden Erfindung ist es, daß das Filter 10 veränderlicher Durchlässigkeit hinter dem Bildverstärker 4 angeordnet ist. Dieser Bildverstärker 4 erzeugt genug Verstärkungsgewinn, um es zuzulassen, daß das Ausgangslicht zwischen den Detektoren aufgespalten wird, ohne daß die Gesamtqualität der Wirkungsweise  
25 leidet. Es muß jedoch ein Nachteil bei der Verwendung des Verstärkers 4 in Kauf genommen werden, da es sich nicht um einen vollkommenen Verstärker handelt und dieser einige Störungen in das Bild des Objekt-Fleckens einführen kann. Diese vom Verstärker erzeugte Störung kann jedoch dadurch unbedeutend gemacht werden, daß der Verstärkungsgewinn erhöht wird und so große Photonenflüsse an der Maskenreihe erzeugt werden.

35 Die Filterreihenanordnung 10 ist eine Maske, welche so viele Maskenzellen 100 hat, wie Strahl-Subaperturen vorhanden



den sind. Jeder Subapertur-Flecken 200 wird auf eine einzelne Maskenzelle 100 fokussiert. Wie in dem vergrößerten Bereich von Fig. 1 gezeigt ist, hat jede Zelle 100 eine linear veränderliche Lichtdurchlässigkeitseigenschaft längs einer Richtung der Bildpunktbewegung. In dem Beispiel von Fig. 1 ist die veränderliche Lichtdurchlässigkeitseigenschaft horizontal, d.h. längs der X-Achse der Zelle 100. Der Bildpunkt oder Flecken, der mit 200 bezeichnet und in durchgezogenen Linien gezeichnet ist, ist auf die Zelle 100 zentriert und repräsentiert den Flecken, der durch die nicht-geneigte Bezugswellenfront des Strahles 9 erzeugt wird. Der Flecken 200a repräsentiert den Bildpunkt von einer Subapertur des Strahles, der in der positiven X-Richtung geneigt ist.

Wie man erkennen kann, enthält die Zellenmaske eine Mehrzahl einander abwechselnder undurchsichtiger und transparenter, langgestreckt V-förmiger Muster oder Streifen 210 bzw. 212, welche so angeordnet sind, daß die Y-Abmessung der undurchsichtigen Streifen 210 in der negativen X-Richtung breiter sind und in der positiven X-Richtung linear abnehmen, während das Umgekehrte für die transparenten Streifen 212 gilt. Ein Vergleich des zentrierten Fleckens 200 und des relativ zu der Streifenmaske verschobenen Fleckens 200a läßt deutlich werden, daß die Intensität des am Photodetektor 24 von der Zelle 100 detektierten Lichtes für den Flecken 200a größer ist als für den Flecken 200 (, wobei angenommen sei, daß sie zunächst von gleicher Intensität waren), da ein kleinerer Anteil von dem Flecken 200a durch die undurchsichtigen Streifen 210 durchsetzt wird, als dies bei dem zentrierten Flecken 200 der Fall ist. In entsprechender Weise wird ein Flecken, der in die negative X-Richtung verschoben ist, durch die undurchsichtigen Streifen 210 stärker abgeschwächt, was in einer niedrigeren Lichtintensität resultiert, wie sie durch den Photodetektor 24 festgestellt wird.



Auf diese Weise wird die erforderliche Pixel-Gewichtungsmultiplikation für die Bestimmung des Fleckenschwerpunktes in einer einfachen analogen Weise von der Filterreihenanzordnung 10 durchgeführt. Das Summieren der gewichteten Pixel geschieht durch den Detektor 24, der eine Mehrzahl von Photodioden 24a (je einer für je eine Zelle) in einer Reihenanzordnung enthalten kann. Die Photodioden 24a integrieren die Intensität jedes detektierten Subapertur-Pixels, die über die Gesamtfläche des Photodetektors empfangen wird.

Für eine gegebene Subapertur-Eingangs-Bildintensität zu der Maske 10 ist die durch jede Fotodiode 24a festgestellte Ausgangsintensität proportional zu der horizontalen Bildpunkt-Fleckenposition auf jeder Zelle 100 der Filtermaske 10 veränderlicher Durchlässigkeit. Um die Fühlereinrichtung unabhängig von der Eingangsintensität zu machen, wird die Intensität durch eine zweite Detektorreihe 22 gemessen, welche den in Subaperturen unterteilten Eingangsstrahl 122 detektiert, nachdem er durch den Strahlaufteiler 16 teilreflektiert worden ist.

In dem Rechner 28 wird ein Verhältnis der durch die Detektorreihe 24 festgestellten durchgelassenen Lichtintensität zu der Eingangsintensität gebildet, welche durch die Detektorreihe 22 festgestellt wird. Dieses Verhältnis ändert sich in Abhängigkeit von der Bildpunktbewegung.

Man beachte, daß es in manchen Anwendungsfällen vorteilhaft sein kann, die Linse 18 dazu einzusetzen, die Subaperturbilder von dem Kollimator 14 aufzuweiten, anstatt diese Bilder einfach auf die Zellen 100 zu fokussieren, wie dies oben beschrieben wurde. Auf diese Weise wird die Fleckengröße auf der Zelle vergrößert und das Licht wird über einen größeren Teil der Zelle verteilt, um eine größere Linearität zu erhalten.





## II. Die Filterreihenanzordnung

Selbstverständlich ist der wesentliche Teil des Wellenfront-Fühlersystems nach der Erfindung die Filterreihenanzordnung 10. Es ist gerade dieses Filter, das die Pixel-Gewichtungsmultiplikation für die Schwerpunkterrechnung bewerkstelligt. Aus diesem Grunde hängt die Leistungsfähigkeit der Wellenfront-Fühlereinrichtung in kritischer Weise davon ab, wie gut dieses Filter die erforderliche lineare Gewichtung der Intensität vornehmen kann. Es existieren Filter, welche veränderliche Dichteigenschaften haben, die dadurch erreicht werden, daß aufgedampfte metallische Filme veränderlicher Dicke gebildet werden. Mit gegenwärtig bekannter Technologie ist die Linearität solcher Filter maximal etwa 2 Prozent. Dies würde unannehmbare Fehler für die meisten vorhersehbaren Anwendungsfälle des vorliegenden Systems einführen. Aus diesem Grunde erscheint eine binäre Maske in der Gestalt von nur undurchlässigen und transparenten Bereichen und keinen teilweise durchlässigen Bereichen gegenüber einem Filter mit veränderlicher Dicke vorzuziehen.

Weiterhin ist es wünschenswert, die V-förmigen Muster in der vertikalen Abmessung ziemlich klein zu machen, d. h. 10-20  $\mu\text{m}$ , um sicherzustellen, daß der Bildpunkt viele Streifen überdeckt, so daß Fehler ausgemittelt werden, welche durch eine Fleckenbewegung in der Vertikalrichtung oder Y-Richtung auftreten könnten. Die Größe der Maskenzelle 100 sollte auch auf die Subaperturgröße der Anordnung 12 aus kleinen Linsen abgestimmt sein, welche zur Aufteilung der Eingangsblendenöffnung in Subaperturen verwendet wird.

Eine Versuchszellenanordnung, bestehend aus 500  $\mu\text{m}$  im Quadrat großen Zellen mit 50 undurchsichtigen Dreieckstreifen von 10  $\mu\text{m}$  mal 500  $\mu\text{m}$ , siehe Fig. 4, wurde hergestellt und in einer 5x5-Anordnung an 500 $\mu\text{m}$ -Zentren vervielfacht, wie aus Fig. 5 zu ersehen ist. Man beachte, daß zur



Vereinfachung nur 5 undurchsichtige Dreiecksstreifen 212 je Zelle gezeigt sind und daß die Figuren 4 und 5 nicht maßstabsgerecht sind. Praktisch ist der Horizontalmaßstab der Dreiecksstreifen bedeutend größer.

5

Die Versuchszellenanordnung wurde auf ein Glassubstrat aufgebaut, auf welchem eine Dünnschicht-Chromablagerung erzeugt wurde. Die dreiecksstreifenförmigen undurchsichtigen Chromelemente wurden durch Ätzen des Chromfilmes erzeugt.

10 Die Dreiecksstreifenelemente hatten eine Basisbreite von  $10\text{ }\mu\text{m}$ , welche sich linear zu einem Punkt von  $0,5\text{ }\mu\text{m}$  über eine Länge von  $500\text{ }\mu\text{m}$  verminderte, um ein Transmissivitätsprofil über die horizontale Länge der Zelle zu erzeugen, das sich linear von 0% bis 100% ändert.

15

Das Versuchsfenster 10 von Fig. 5 wurde in dem optischen System nach Fig. 6 geprüft, welches die Ausführungsform nach Fig. 1 simuliert. Es sei darauf hingewiesen, daß einander entsprechende Teile in den Figuren 1 und 6 auch die gleichen Bezugszahlen tragen.

20

Die Objektquelle 64 erzeugt einen Strahl 7, der durch den Kollimator 62 kollimiert wird. Die Wellenfrontneigung des Strahls kann durch einen um zwei Achsen einstellbaren

25 Kippspiegel 60 geändert werden. Der gekippte, kollimierte Strahl 7 wird zu einer Anordnung 12 kleiner Linsen geführt, welche beugungsbegrenzte verschleierte Flecken auf der Fotokathode der Bildröhre erzeugen. Die verstärkte Reihen-anordnung von verschleierte Punkten erscheint an dem Aus-

30 gangsschirm der Bildröhre und wird durch eine zusammenfassende Linse 14 ( $f/0,95$ ) kollimiert. Dieser verstärkte kollimierte Strahl 122 verläuft durch einen teilreflektierenden Strahlaufteiler 16, der 30% des Lichtes zu der Fotovervielfacherröhre (PMT 22) schickt, welche den Kanal des

35 Nenners der Verhältnisrechnung der Wellenfront-Fühlereinrichtung repräsentiert. Der zu 70% übertragene Strahl 126 tritt in eine identische  $f/0,95$ -Linse 18 ein und die Flek-



ken werden auf die Filterreihe 10 abgebildet. Das von dem Filter 10 durchgelassene Licht wird durch die zweite Fotovervielfacherröhre 24 detektiert. Die Ausgangssignale von den beiden Fotovervielfacherröhren repräsentieren den einfallenden Strahl und den durchgelassenen Strahl der Wellenfront-Fühlereinrichtung.

Dieses optische System wurde in zwei Betriebsweisen betrieben. In der ersten Betriebsweise wurde die Objektsimulatorquelle 64 so betätigt, daß sie hohe Lichtwerte erzeugte. Die Ausgangsströme der beiden Fotovervielfacherröhren 22 und 24 wurden aufgezeichnet, während die Wellenfrontneigung geändert wurde. Da der Photonenfluß an der Filterreihenordnung 10 in dieser ersten Betriebsweise sehr hoch war (größenordnungsmäßig  $10^6$  Photonen/s), gestattete diese Betriebsweise die Prüfung des Filters 10 ohne die Berücksichtigung eines zusätzlichen Rauschens aufgrund von Photonstatistiken.

Fig. 8 ist ein Diagramm eines Verhältnisses des durchgelassenen Lichtes zu einfallendem Licht über der Bildpunktposition auf dem Filter für eine charakteristische Datengruppe, welche erhalten wurde, wenn sich die Bildpunkte oder Flecken durch eine Zelle des Filters bewegten. Legt man eine gerade Verhältnislinie A durch den mittleren Teil der Daten, so zeigt sich, daß die Effektivwerte der Fehler in der Neigung, welche durch das System vorhergesagt werden, 0,6% über einen dynamischen Bereich von 3,2 Wellen der Neigung des Eigangsstrahles sind. Der angezeigte etwas beschränkte dynamische Bereich beruht vermutlich teilweise auf einem Überfließen von Licht von benachbarten Subaperturen oder Zellen. Die Linearitätsfehler beruhen vermutlich hauptsächlich auf Zufallsfehlern in dem Fotovervielfacher-Datenaufzeichnungssystem, welches einen 8-Bit-A/D Umformer enthält.



Das Überlaufproblem kann durch Verwendung einer Maskenzelle abgemildert werden, wie sie in Fig. 7a gezeigt ist, wobei ein undurchsichtiger Rand 115 um jede Zelle 100' gelegt ist.

5

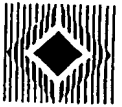
In einer zweiten Betriebsweise wurde der Lichtpegelwert der Objektsimulatorquelle 64 auf einen Wert reduziert, bei welchem es möglich wurde, einzelne Photonen an den Fotovervielfacherröhren 22 und 24 zu detektieren. Die Ladungsimpulse von den Fotovervielfacherröhren wurden integriert, digitalisiert und einzeln ins Verhältnis gesetzt, wodurch es möglich wurde, die Daten eines einzelnen Eingangsphoton nach dem anderen zu akkumulieren. Der Fehler in der akkumulierten Schwerpunktmessung wurde als eine Funktion der Photonenzahl kontrolliert. In diesem Falle zeigte es sich, daß der Schwerpunktfehler Photonenstatistik-begrenzt war, da der Digitalisierungsfehler eliminiert worden war. Es zeigte sich, daß die erforderliche Schwerpunktberechnungsgenauigkeit mit weniger als 300 detektierten Eingangsphotonen und einem Bildröhrengewinn von 12600 erreicht werden könnte. Es wurde gefunden, daß die Linearität des Filters 10 besser als 0,3% war, nahe an demjenigen Wert, der durch numerische Rechnungen vorhergesagt worden war.

25 Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß es sich zeigte, daß die Leistungsfähigkeit eines Prototyps des Filters nach der Erfindung die Anforderungen übertraf, die sich bei typischen Wellenfront-Fühlereinrichtungen in der Anwendung ergeben.

30

### III. Alternative Ausführungsformen der Filterreihenanz- ordnung

Andere Ausführungsformen der in Abschnitt II beschriebenen Filterreihenanzordnung werden nun im Zusammenhang mit den Figuren 7B bis E beschrieben. Zur Vereinfachung ist in jedem Falle nur eine der Mehrzahl von Filterzellen gezeigt.



A. Balken: In Fig. 7B wird die lineare Durchlässigkeitseigenschaft durch Schaffen einer Filtermaskenzelle 100B mit parallelen, einander abwechselnden undurchlässigen Linien oder Balken L1 und transparenten Linien L2 von veränderlicher Breite und veränderlichem Abstand erreicht .

B. Punkte: Die Filterzelle 100C von Fig. 7C besteht aus undurchsichtigen Kreisscheiben oder Punkten "O" von veränderlichen Durchmessern (wie bei der Halbton-Reproduktion), welche dazu dienen, Anteile des übertragenen Strahls zu verlegen.

C. Nicht lineare Gebilde: Während die Durchlässigkeitseigenschaft der Zellen nach den Figuren 7A bis C sich linear verändern, können alle diese Ausführungsformen auch so angepasst werden, daß sie einem anderen als einem linearen Gewichtungsalgorithmus entsprechen.

Aus der obigen Diskussion dürfte es nun klar sein, daß die Tätigkeit der Filtermaske darin besteht, eine gegebene Funktion der Bildpunkt-Intensitätsverteilung in die übertragene Intensität hinein zu kodieren. Analytisch ist der Bruchteil  $F_T$  des durch das Filter hindurchgelassenen Lichtes durch folgende Gleichung gegeben:

$$F_T = \frac{\int_{\text{Zelle}} I_S(x,y) T(x,y) dx dy}{\int_{\text{Zelle}} I_S(x,y) dx dy} \quad (1)$$

Hierin ist  $I_S(x,y)$  die Flecken- oder Bildpunkt-Intensitätsverteilung,  $T(x,y)$  ist die Durchlässigkeitsfunktion der Filterzelle und die Integration wird über die Fläche der Filterzelle durchgeführt.

Es ist daher möglich, eine Vielfalt möglicher Durchlässigkeitsfunktionen zu entwickeln. In den oben beschriebenen



Ausführungsformen ist  $T(x,y)$  eine lineare Funktion von der x-Position, d.h.,

$$T(x,y) = x/W \quad (2)$$

worin  $W$  die Filterzellenbreite ist. Somit wird Gleichung 1:

$$FT = \frac{\int_{\text{Zelle}} IS(x,y) x \, dx \, dy}{\int_{\text{Zelle}} IS(x,y) \, dx \, dy} \quad (3)$$

Dies ist die Definition des eindimensionalen Schwerpunktes oder ersten Momentes der Bildpunkt-Intensitätsverteilung. Dieser Schwerpunkt ist typischerweise die Größe, welche als Ausgang einer Wellenfront-Fühlereinrichtung der Hartmann-Bauart gewünscht wird.

Es gibt aber Fälle, in denen nicht lineare Durchlässigkeitsfunktionen bei der Wellenfrontdetektierung zweckmäßig sind. Es kann beispielsweise rechnerisch gezeigt werden, daß dann, wenn eine stufenförmige Diskontinuität in der Phase der Wellenfront über eine Subapertur vorhanden ist, das zweite Moment der Bildpunkt-Intensitätsverteilung dazu verwendet werden kann, die Größe dieser Diskontinuität zu messen. Eine solche Messung könnte dazu dienen, nebeneinanderliegende Spiegelsegmente, deren Grenze innerhalb der Subapertur liegt, auszurichten oder phasenmäßig einzustellen. Das zweite Moment  $L$  der Bildpunkt-Intensitätsverteilung in einer Abmessungsrichtung ist:

$$L = \int_{\text{Zelle}} IS(s,y) x^2 \, dx \, dy$$

Es ist klar erkennbar, daß dies durch Konstruktion einer Filtermaske verwirklicht werden kann, deren Durchläs-



sigkeitsfunktion quadratisch ist und durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$T(x, y) = x^2/w^2$$

5

D. Quadratisch: Eine solche quadratische Gewichtung proportional zu einer Bildpunktverlagerung in der Horizontalrichtung ist in der Maskenzelle 100D von Fig. 7D gezeigt. In Fig. 7D ändert sich die Breite der undurchsichtigen Teile des Musters entsprechend dem Quadrat des Abstandes in der Horizontalrichtung oder X-Richtung. Solche Masken können dazu verwendet werden, Momente höherer Ordnung der Lichtverteilung zu errechnen.

10

E. Axial: Masken mit einer axialen Symmetrie wie sie in Fig. 7E gezeigt ist, finden Anwendung in Fällen, in welchen die Richtung der Bildpunktverlagerung nicht wichtig ist, sondern nur die Größe dieser Verlagerung gemessen werden muß. In der Maskenzelle 100E von Fig. 7D erstrecken sich abwechselnd undurchsichtige und durchsichtige radiale Speichen  $S_1$  bzw.  $S_2$  radial von dem Zentrum der Maskenzelle weg.

15

20

#### IV. Zweiachsige Wellenfront-Fühlereinrichtung

Es sei bemerkt, daß die Wellenfront-Fühlereinrichtung, welche zuvor in Verbindung mit Fig. 1 beschrieben worden ist, nur zur Bestimmung der Wellenfrontneigung in einer einzigen Achsenrichtung geeignet ist, da die Durchlässigkeitseigenschaften der Zellen der Filter sich nur linear in einer Achsenrichtung, d.h., in der Richtung der Horizontalachse oder X-Achse ändern.

25

30

Um eine Messung der Neigung in Vertikalrichtung oder Y-Achsenrichtung vorzusehen wird der Strahl von dem Kollimator 14 von Fig. 1 in drei gesonderte Strahlen aufgeteilt. Eine derartige Ausführungsform wird nun in Verbindung mit den Figuren 9 und 9A beschrieben. Wie man aus Fig. 9 er-

35



sieht, sind in dem Weg des Bildverstärkerstrahles, nachdem dieser von dem Kollimator 14 kollimiert worden ist, drei Rück-Abbildungseinrichtungen 18X, 18Y und 20 angeordnet. Wie aus Figur 9A ersichtlich sind die Rück-Abbildungseinrichtungen in einem dreieckigen Flächenbereich angeordnet, um den kollimierten Strahl dreizuteilen. Der kollimierte Strahl wird also effektiv in drei identische gesonderte Strahlen 122a, 122b und 122c aufgeteilt, welche auf Linsen 18X bzw. 20 bzw. 18Y treffen.

10

Der Bildstrahl von der Linse 18 wird auf die, der X-Koordinate zugeordnete, Gewichtungsmaskengruppe 10X projiziert, welche identisch zu der Maske 10 von Fig. 1 ist, und wird entsprechend Fig. 1 verarbeitet. Der Bezugsstrahl 124 wird durch die Linse 20 unmittelbar auf die Fotodetektoranordnung 22 abgebildet, wie dies auch in Verbindung mit Fig. 1 beschrieben wurde.

Der zusätzliche Y-Achsen-Strahlkanal wird durch Projizieren des dritten Strahles 122c mittels der Linse 18Y auf die der Y-Koordinate zugeordnete Gewichtungsmaskengruppe 10Y gebildet. Die Maskengruppe 10Y ist identisch zu der Maskengruppe 10X mit der Ausnahme, daß die Streifenspitzen 212Y und 210Y jeder Zelle 100Y um 90 Grad gegenüber denjenigen der Zelle 100X verdreht sind, wie in der vergrößerten Darstellung gezeigt ist.

Gewünschtenfalls kann eine Anzahl sich verjüngender Faseroptikblöcke 90X, 90Y vorgesehen sein, welche mit Bezug auf die Maske 10X bzw. 10Y zwischengeschaltet sind, um eine Bildverkleinerung vorzunehmen, wenn die Filterzellengröße nicht klein genug gemacht werden kann, um eine unmittelbare Anpassung an die Pixelgröße der Detektoren 24x und 24y vorzunehmen.

35

Eine Fleckenbewegung oder Bildpunktbewegung in Vertikalrichtung oder Y-Richtung wird also durch die Maske 10Y

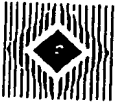




in der selben Weise gewichtet, wie dies zuvor in Verbindung mit Fig.1 beschrieben wurde. Die gewichtete Pixelintensität von der Maske wird durch die Fotodetektor-Reihenanzordnung 24Y detektiert und mit der ungewichteten Bezugsstrahlintensität ins Verhältnis gesetzt, welche durch die Fotodetektor-Reihenanzordnung 22 bestimmt worden ist.

Eine alternative zweiachsige Wellenfront-Fühlereinrichtung ist in vereinfachter schematischer Form in Fig. 10 gezeigt, in der gleiche Teile identische Bezugszahlen tragen. Bei dieser Ausführungsform ist eine Spiegelpyramide 500 mit drei Facetten in der Bildebene des kollimierten Strahles 122 von dem Bildverstärker 4 angeordnet, um den Strahl in die drei Strahlen 122a, 122b und 122c aufzuteilen, welche jeweils kleiner als der kollimierte Strahl sind, der von dem Kollimator 14 erzeugt wird. Diese Ausführungsform hat einen Vorteil, der darin besteht, daß die Brennweiten der Rückabbildungslinsen 18X, 18Y und 20 kürzer sein können als diejenige des Kollimators 14, wodurch man eine lineare Maßstabsverminderung erhält.

Eine dritte Alternative für die Strahlaufteilung besteht darin, daß man in einfacher Weise einen zweiten Strahlaufteiler 16 zusätzlich zu dem in Fig. 1 gezeigten verwendet, um eine Aufteilung auf drei Wege vorzunehmen. Der Nachteil dieser Konstruktion ist es, daß die Rückabbildungslinsen sich der vollen Größe des kollimierten Strahles anpassen müssen. Da die Kollimatorlinse eine außerordentlich lichtstarke Linse sein muß, ist der Strahldurchmesser groß im Vergleich zu der Kollimator-Brennweite. Wenn daher die Rückabbildungslinsen diesen vollen Strahl aufnehmen sollen, so können ihre Brennweiten nicht sehr unterschiedlich gegenüber derjenigen des Kollimators sein. Da die Vergrößerung des Systems durch das Verhältnis dieser Brennweiten festgelegt ist, erlaubt die vorliegende Aufteilungsmethode nicht die Minimalisierung der Bildpunkte auf den Fil-



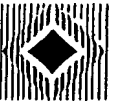
tern, was notwendig sein kann, wenn die Detektordioden in ihrer Größe kleiner als die Maskenzellen sind.

#### V. Zweidimensionale Detektierung mit einer einzigen Maske

5 Eine andere Klasse von Maskenzellen umfasst Muster, welche nicht vollständig undurchsichtig sind, wie dies in Fig. 11 gezeigt ist. Die Streifen-Maskenzellen in Fig. 11  
10 haben zugespitzte Streifen  $C_1$  und  $C_2$ , welche selektiv verschiedene Lichtwellenlängen durchlassen. Beispielsweise absorbieren die Streifen  $C_1$  Licht im Bereich der Rotwellenlängen und die Streifen  $C_2$  absorbieren Licht im Bereich der Blauwellenlängen. Die Maskenzelle 100F kann dazu verwendet  
15 werden beispielsweise den Schwerpunkt der Verteilungen nur solcher Lichtwellenlängen zu errechnen, bei welchen die Streifen undurchsichtig sind. Eine Verwendung einer solchen Maske wäre gegeben für eine zweiachsige Schwerpunktberechnung in der Form von zwei Spitzstreifenmustern  $C_1$  und  $C_2$   
20 mit unterschiedlicher Wellenlängen-Undurchlässigkeitseigenschaft, welche in der selben Maskenzelle um  $90^\circ$  relativ zueinander versetzt sind, wie dies in Fig. 11 gezeigt ist. Das durchgelassene Licht wird durch zwei Detektoren  $D_1$  und  $D_2$  (Fig. 12) mit optischen Übertragungsfiltern detektiert,  
25 die bezüglich der Wellenlänge an die zwei Streifenmuster  $C_1$  und  $C_2$  angepasst sind. Der Schwerpunkt eines Bildpunktes aus weißem Licht kann also in beiden Achsenrichtungen mit nur einen einzigen Filtermaskenreihe detektiert werden.

#### 30 VI. Maske mit veränderbarer Durchlässigkeit

Es ist auch möglich, Filtermasken zu bauen, deren Durchlässigkeitseigenschaften elektrisch verändert werden können. Eine solche Maske kann aus Flüssigkristallgeräten  
35 hergestellt werden, wie in Fig. 13 gezeigt ist, wobei die Undurchlässigkeit jedes Flüssigkristallgerätes elektrisch durch elektronische Zeilenimpulse und Spaltenimpulse verän-

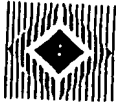


5 dert werden kann. Auf diese Weise kann die Gewichtung, die  
einem gegebenen Pixel aufgeprägt wird, in Abhängigkeit von  
einem äußeren Signal verändert werden. Dies ermöglicht Fil-  
termaskenausführungen, die funktionelle Multiplikationen  
durchführen, beispielsweise Kombinationen eines optische  
Signales mit einem elektrischen. In dem Gerät von Fig. 13  
umfasst die Zelle 100G undurchsichtige Spitzstreifen C13,  
welche dadurch angenähert sind, daß ausgewählte Flüssigkri-  
stallgeräte einer NXM-Anordnung von Flüssigkristallgeräten  
10 eingeschaltet werden.

### VII. Elektronische Masken

15 Eine analoge Klasse von Ausführungsformen kommt in Be-  
tracht, bei welcher die Masken in elektronenoptischen Sy-  
stemen anstelle von fotooptischen Systemen verwirklicht  
werden. Wie beispielsweise in Fig. 14 und Fig. 15 gezeigt,  
wird der Ausgangsleuchtschirm eines allgemein bekannten  
Bildverstärkers 400 durch eine Reihenanordnung 101 elek-  
20 trisch leitfähiger Spitzstreifenmuster C14 (Fig. 15) er-  
setzt, welche die Zellen 100H bilden. Auf diese Weise wird  
die Schwerpunktberechnung direkt an dem elektronischen Bild  
durchgeführt, das an dieser Stelle vorhanden ist.

25 Zu diesem Zwecke wird der Ausgang der Reihenanordnung  
12' kleiner Linsen auf eine Bildpunkt-Abbildungseinrichtung  
401 fokussiert, welche ein Faseroptik-Eingangsfenster ent-  
hält, welches die Lichtpunkte unmittelbar auf die Fotoka-  
thode 402 hinleitet. Die Beschleunigungselektrode 405 er-  
30 höht die Energie des Elektronenstrahls und die elektroni-  
sche Linse 404 fokussiert den Elektronenstrahl von der Fo-  
tokathode auf die elektrisch leitfähige Maske 10', um einen  
verstärkten elektrischen Signalausgang von der Maske zu er-  
zeugen, welcher die Bildpunktintensität von jeder Subaper-  
35 tur repräsentiert, die durch eine Funktion proportional zu  
dem Elektronensammelmuster der leitfähigen Maske kodiert



ist. Diese Signalausgänge von jeder Zelle 100H werden in dem Detektor 415 detektiert.

Andere optische Ausführungsformen der Erfindung können  
5 in entsprechender Weise in analoge elektronenoptische Anordnungen umgesetzt werden. Solche Systeme sollen Vereinfachungen des optischen Aufbaus einer Wellenfront-Fühlereinrichtung ergeben. Beispielsweise kann anstelle der Beschleunigungselektrode 405 von Fig. 14 ein Mikrokanalplatten-Elektronenvervielfacher eingesetzt werden.  
10

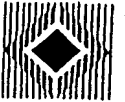
#### Äquivalente

Dies vervollständigt die Beschreibung der bevorzugten  
15 Ausführungsformen der Erfindung. Für die Fachleute ergeben sich jedoch gegenüber dem hier beschriebenen Ausführungsformen andere äquivalente Ausführungsformen, welche durch die beigefügten Ansprüche mit umfasst sein sollen. Beispielsweise benutzen die optischen Ausführungsformen, welche  
20 hier beschrieben wurden, die Durchlässigkeitseigenschaften einer optischen Maske zur Kodierung einer Funktion der Bildpunkt-Intensitätsverteilung. Es ist auch daran gedacht, die Reflexionseigenschaften einer Fotomaske in gleicher Weise auszunützen. In den Ansprüchen ist daher der  
25 breitere Ausdruck "Richtcharakteristiken" verwendet, welcher beide Fälle umfassen soll.



### Ansprüche

1. Optische Wellenfront-Fühlereinrichtung zur Bestimmung  
5 einer Wellenfrontabweichung in einem Lichtstrahl, mit  
- Strahlteilmitteln (12) zur Unterteilung des Licht-  
strahls in eine Mehrzahl von Teilaperturkomponenten  
(120) des Lichtes;  
- Detektormitteln (24) zur Bestimmung der Signalinten-  
10 sität entsprechend der Lichtintensität, die von jeder  
Teilaperturkomponente (120) ausgeht;  
- Abbildungsmitteln (14, 18) zur Signalübertragung zwi-  
schen den genannten Strahlteilmitteln (12) und den  
Detektormitteln (24), sowie Bildinformations-Verstär-  
15 kermitteln (4), welche auf das Licht von jeder Teila-  
perturkomponente (120) ansprechen, um die Signalinten-  
sität entsprechend dem Licht von jeder Teilaperturkom-  
ponente (120) zu erhöhen,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
20 eine Filterreihenanzordnung (10) vorgesehen ist, die  
zwischen den Bildinformations-Verstärkermitteln (4) und  
den Detektormitteln (24) angeordnet ist und eine Anzahl  
von Zellen (100) enthält, die jeweils eine Richtcharak-  
teristik aufweisen, die sich in mindestens einer Rich-  
25 tung einer Bildpunktbewegung der Abbildungsmittel (14,  
18) verändert.
2. Fühlereinrichtung nach Anspruch 1,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
30 die genannte Filterreihenanzordnung (10) eine Filtermas-  
kenanzordnung mit einer Anzahl von Maskenzellen (100)  
ist, daß die Abbildungsmittel optische Abbildungsmittel  
sind und daß die Bildinformations-Verstärkermittel  
Bildverstärkermittel sind, welche ein verstärktes opti-  
35 sches Bild liefern.
3. Fühlereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2



dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Richtcharakteristik jeder der genannten  
Zellen (100) der Filterreihenanzordnung (10) eine li-  
neare Funktion ist.

5

4. Fühlereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Richtcharakteristik jeder der genannten  
Zellen (100) der Filterreihenanzordnung (10) eine qua-  
dratische Funktion ist.

10

5. Fühlereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Richtcharakteristik jeder der genannten  
Zellen (100) der Filterreihenanzordnung (10) eine Funk-  
tion des Quadrates des Abstandes über die Zelle hin in  
einer vorbestimmten Richtung ist.

15

6. Fühlereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Richtcharakteristik jeder der genannten  
Zellen (100) der Reihenanzordnung (10) sich als eine li-  
neare Funktion der radialen Ablage von dem Zentrum je-  
der der genannten Zellen (100) ändert.

20

25

7. Fühlereinrichtung nach Anspruch 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
jede Maskenzelle eine lineare Reihe sich abwechselnder  
undurchsichtiger und transparenter Streifen aufweist  
und daß die Richtcharakteristik das Transmissionsver-  
halten ist.

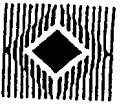
30

8. Fühlereinrichtung nach Anspruch 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
jede Maskenzelle eine lineare Reihe abwechselnd un-  
durchsichtiger und transparenter paralleler Linien auf-  
weist.

35



9. Fühlereinrichtung nach Anspruch 2,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
jede Maskenzelle eine lineare Reihe von abwechselnd un-  
durchsichtigen und transparenten Kreisen aufweist.
10. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 2 oder 7 bis  
9,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Filtermaskenanordnung (10) Maskenzellen  
aufweist, deren Richtcharakteristik elektrisch verän-  
derbar ist.
11. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannte Filterreihenanzordnung (10) zwei Gruppen  
von Zellen enthält, wobei die Richtcharakteristik einer  
Gruppe dieser Zellen sich in einer ersten Richtung ver-  
ändert und die Richtcharakteristik der zweiten Gruppe  
sich in einer hierzu senkrechten Richtung ändert.
12. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannten Strahlteilmittel (12) eine Gruppe von  
kleinen Linsen enthalten, die in dem Weg des Strahles  
angeordnet sind.
13. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
zusätzlich zu den genannten Detektormitteln (24) zweite  
Detektormittel (22) zur Bestimmung der Lichtintensität  
vorgesehen sind, die unmittelbar aus den genannten  
Bildinformations-Verstärkermitteln (4) empfangen wird,  
und daß Rechtermittel (28) zur Berechnung des Verhält-  
nisses des Signales aus den erstgenannten Detektormit-  
teln (24) und des Signales aus den genannten zweiten  
Detektormitteln (22) dienen.



14. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 6,  
dadurch gekennzeichnet, daß
- 5 a) die genannten Bildinformations-Verstärkermittel (4) eine Linse (401) zur Abbildung der Teilaperturen (120), photoelektronische Mittel (402), die auf das abgebildete Licht von jeder Teilaperturkomponente (120) ansprechen, um das genannte abgebildete Licht in
- 10 Elektronenstrahlen umzuwandeln, sowie Mittel enthalten, um die in jedem Elektronenstrahl enthaltene Energie zu erhöhen;
- b) die genannte Filterreihenanzordnung (10) gegenüber Elektronen empfindliche Mittel enthält, um die
- 15 räumliche Verteilung der Energie in den genannten Elektronenstrahlen zu bestimmen; und
- c) die genannten Detektormittel (24) elektronische Mittel enthalten, um die Wellenfrontabweichung aus dem Ansprechen der genannten, gegenüber Elektronen
- 20 empfindlichen Mittel zu bestimmen.
15. Fühlereinrichtung nach Anspruch 14,  
dadurch gekennzeichnet, daß
- 25 die genannten photoelektronischen Mittel aus einer Photokathode bestehen.
16. Fühlereinrichtung nach Anspruch 14 oder 15,  
dadurch gekennzeichnet, daß
- 30 die energieverstärkenden Mittel in einem elektronischen Beschleunigungspotential bestehen.
17. Fühlereinrichtung nach Anspruch 14 oder 15,  
dadurch gekennzeichnet, daß
- 35 die genannten energieverstärkenden Mittel in einem Mikrokanalplatten-Elektronenvervielfacher bestehen.
18. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17,





dadurch gekennzeichnet, daß  
die gegenüber Elektronen empfindlichen Mittel aus leit-  
fähigen Elektroden in einem Maskenmuster bestehen, das  
in dem Weg der Elektronenstrahlen angeordnet ist.

5

19. Fühlereinrichtung nach einem der Ansprüche 14 bis 17,  
dadurch gekennzeichnet, daß  
die genannten, gegenüber Elektronen empfindlichen Mit-  
tel in einer Gruppe von Siliziumdioden bestehen.

10

20. Verfahren zur Bestimmung einer Wellenfrontabweichung in  
einem Eingangslichtstrahl, wobei ein modulierter Be-  
zugslichtstrahl mit dem genannten Eingangslichtstrahl  
kombiniert wird, um einen kombinierten Strahl zu bil-  
den, der in eine Anzahl von Teilaperturkomponenten  
(120) aufgeteilt wird, die durch Detektormittel (24)  
detektiert werden, und wobei die Wellenfrontabweichung  
aus dem Ausgang dieser Detektormittel (24) bestimmt  
wird,

15

20

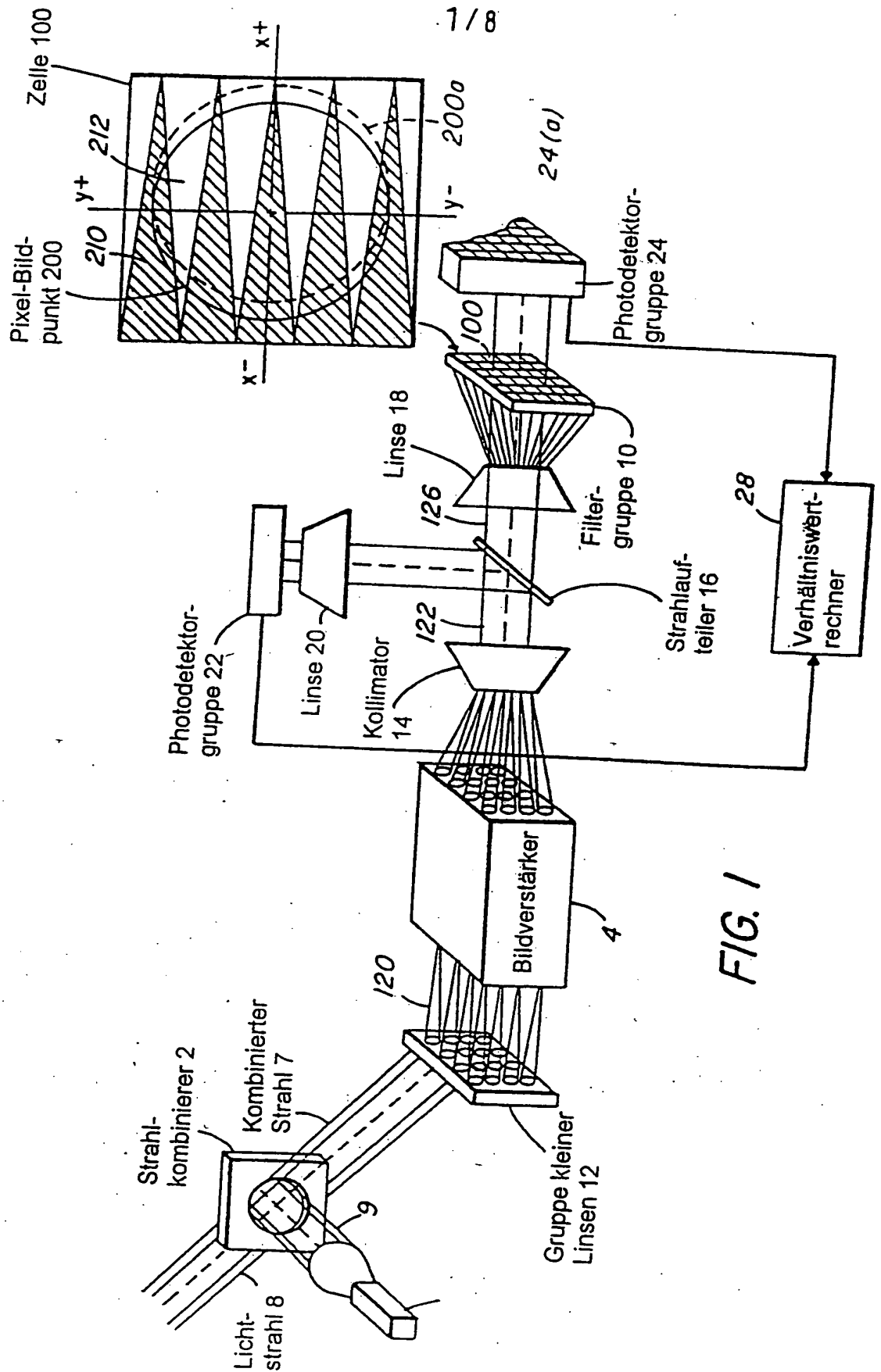
dadurch gekennzeichnet, daß  
a) die Teilaperturkomponenten (120) optisch oder  
elektronisch verstärkt werden;

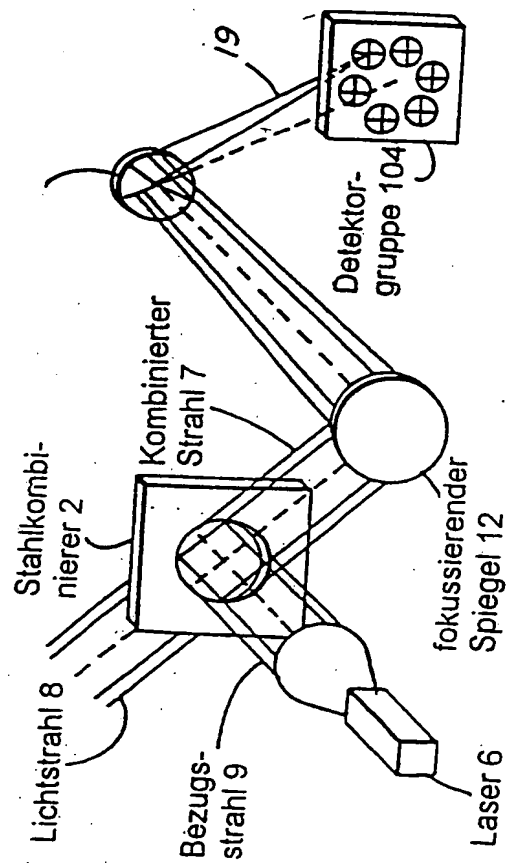
25

b) die genannten verstärkten Teilaperturkomponenten  
(120) optisch oder elektronisch auf eine Filterreihen-  
anordnung (10) abgebildet werden, welche Zellen auf-  
weist, die jeweils eine Richtcharakteristik haben, die  
sich in mindestens einer Richtung der Abbildungspunkt-  
bewegung ändert; und

30

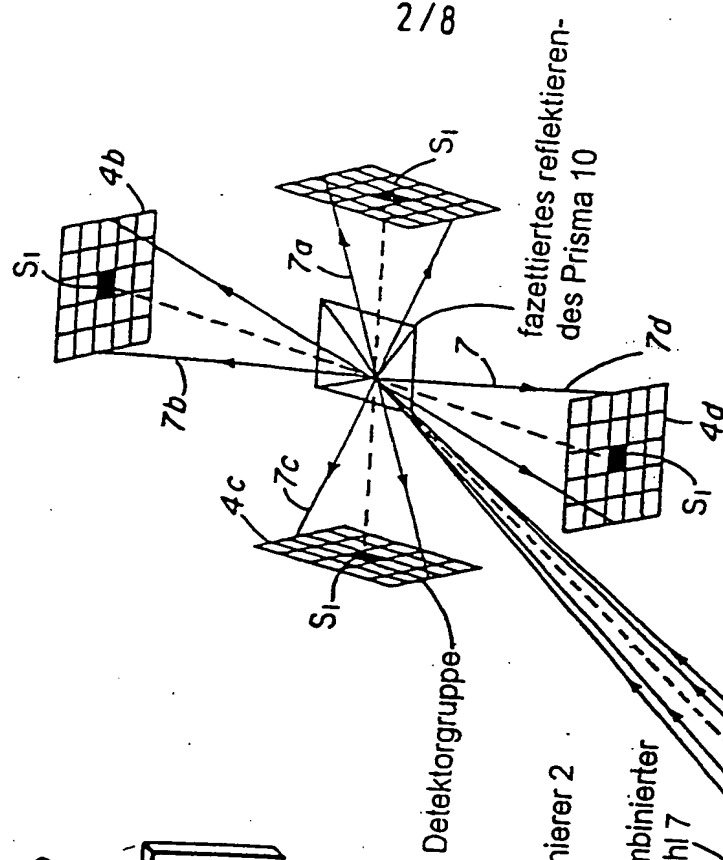
c) die Wellenfrontabweichung aus dem Ausgang jeder der  
genannten Zellen der Filterreihenanordnung (10) be-  
stimmt wird.





**FIG. 2**

Stand der Technik



**FIG. 3**

Stand der Technik

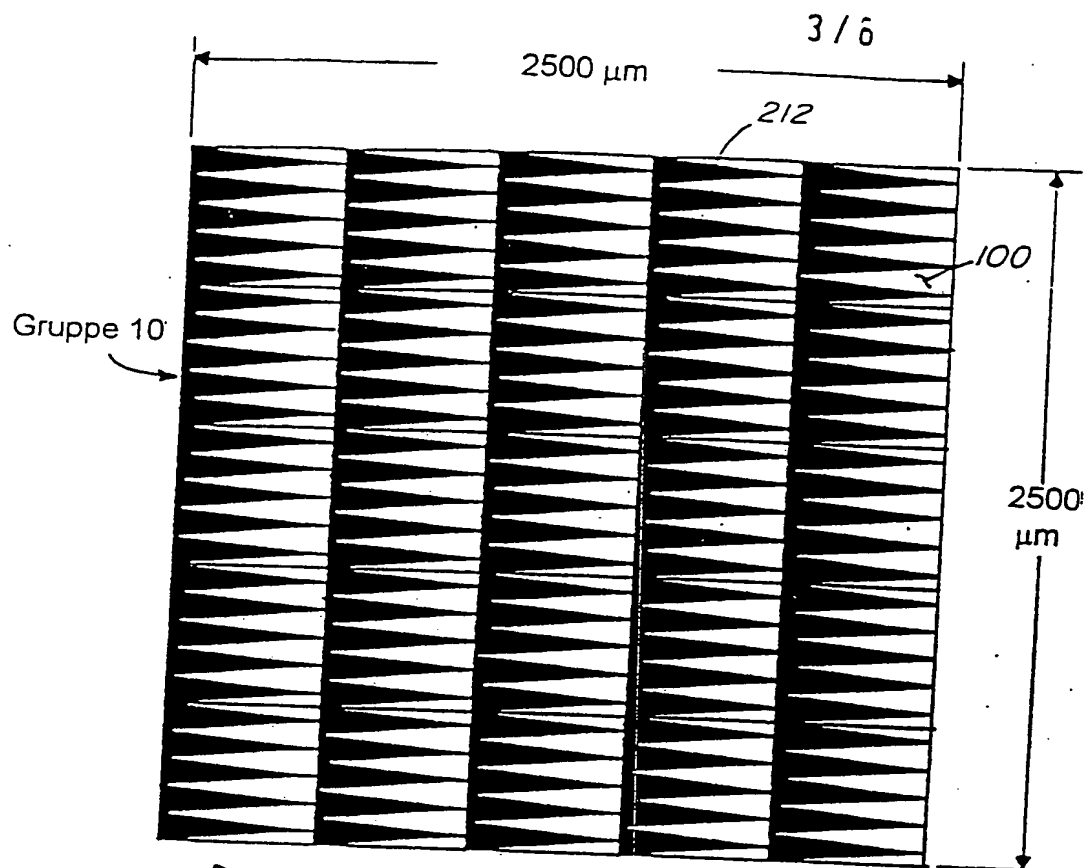


FIG. 5

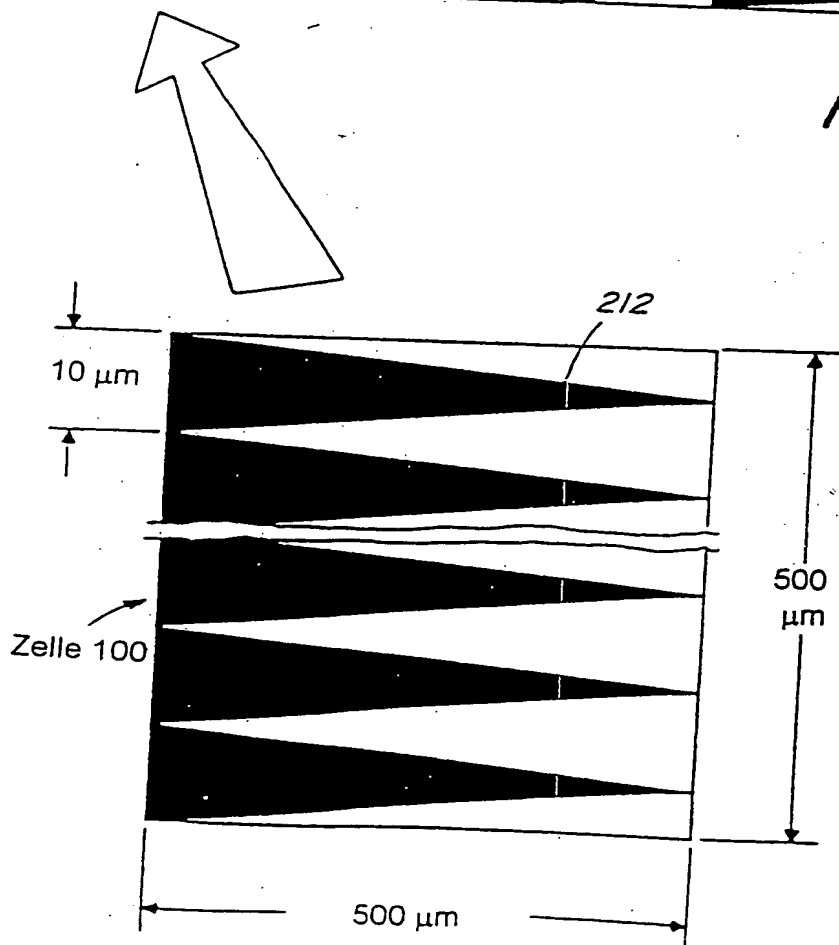


FIG. 4

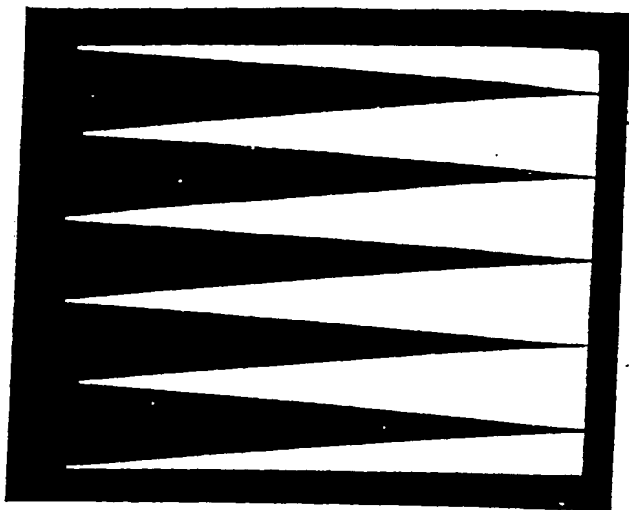


FIG. 7A

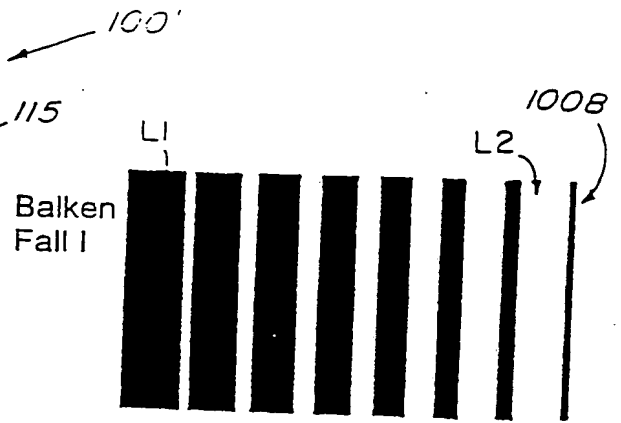
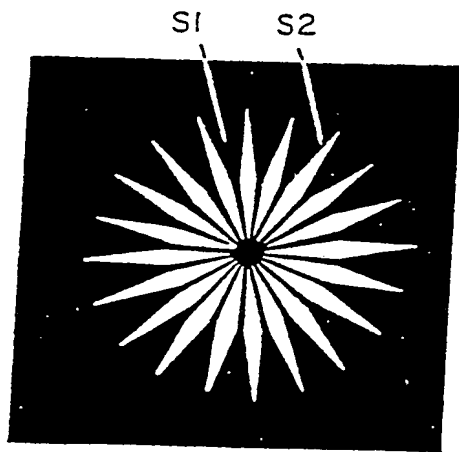


FIG. 7B



Beispiel einer axial  
symmetrischen Maske

FIG. 7E

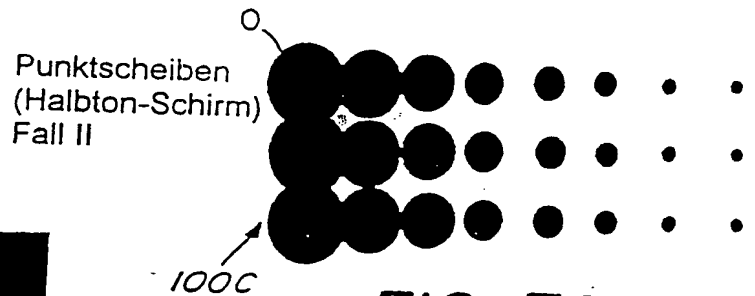


FIG. 7C

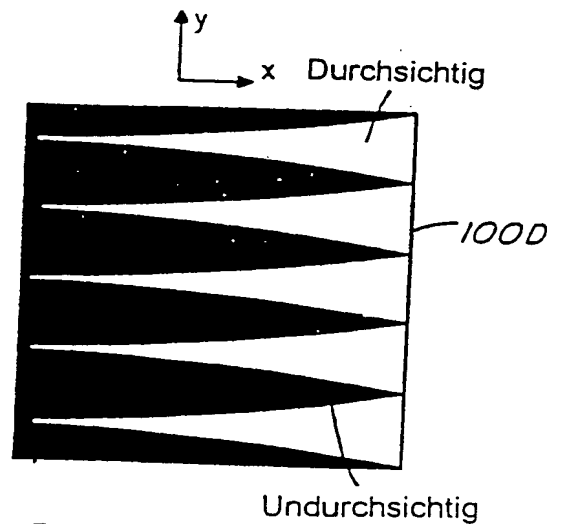


FIG. 7D

FIG. 6

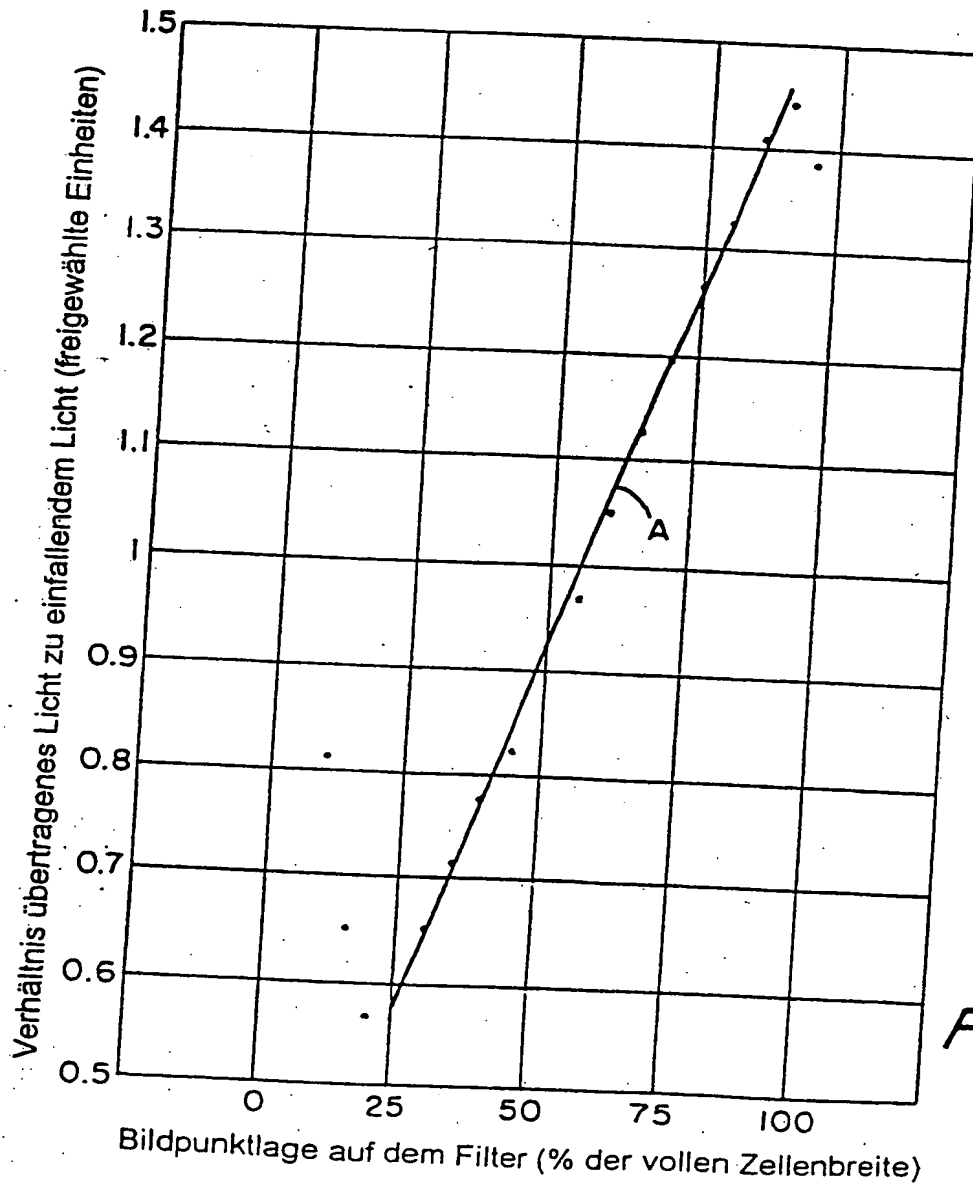
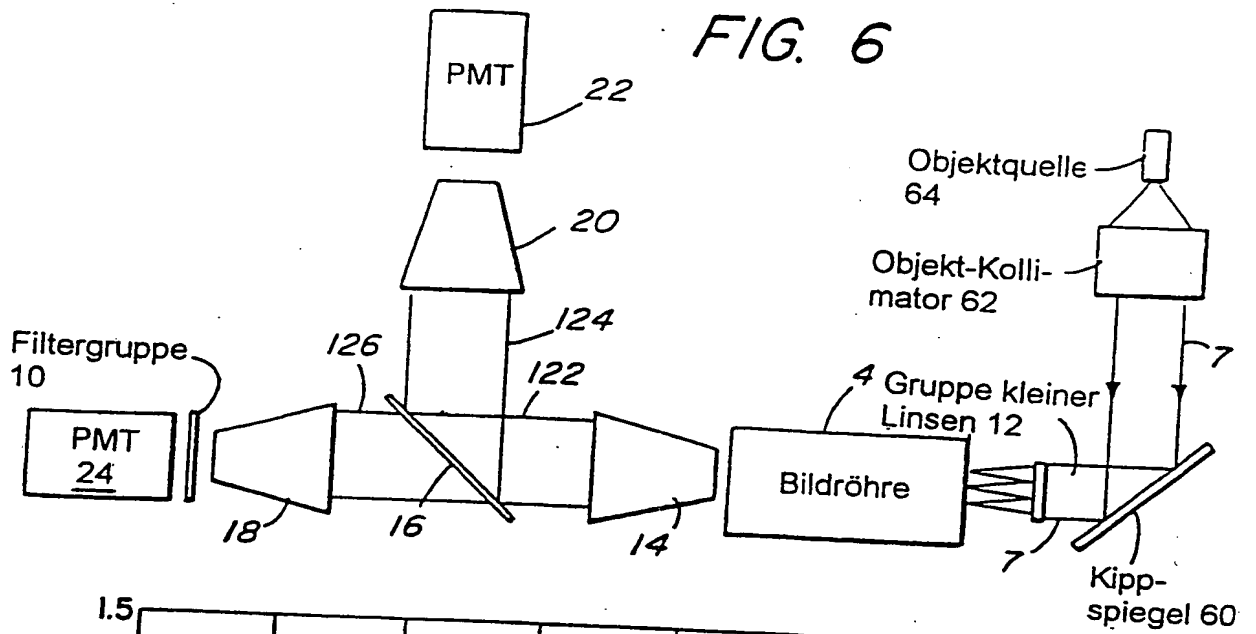
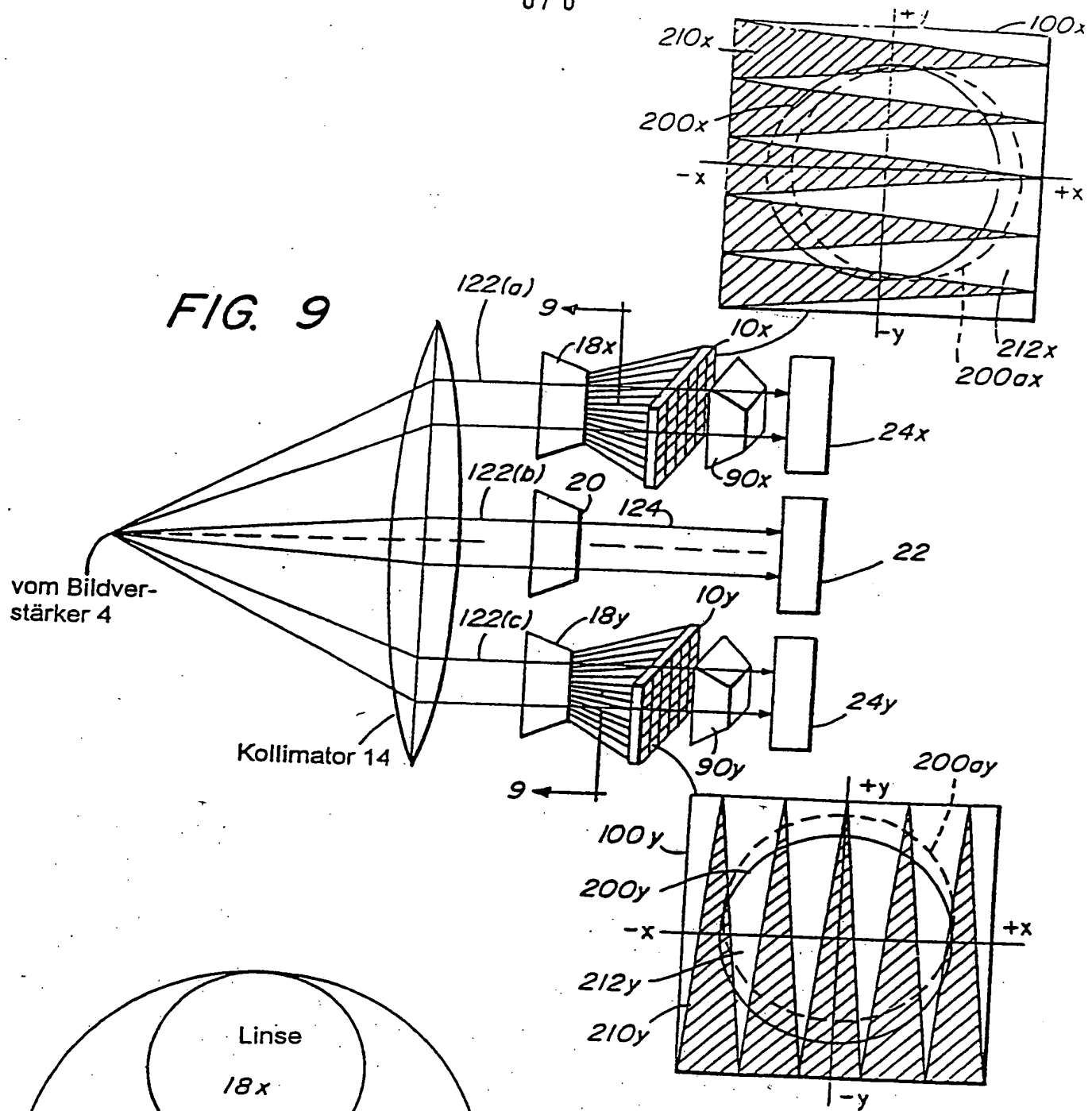
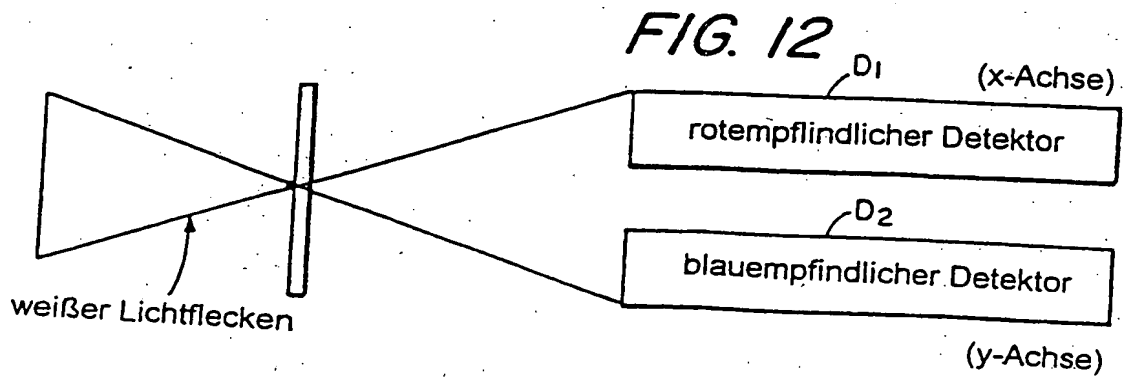
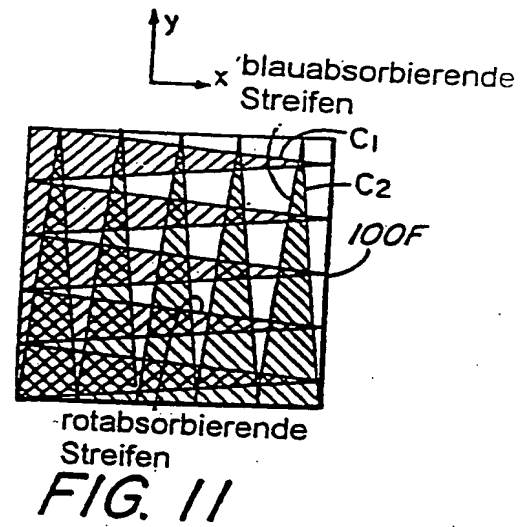
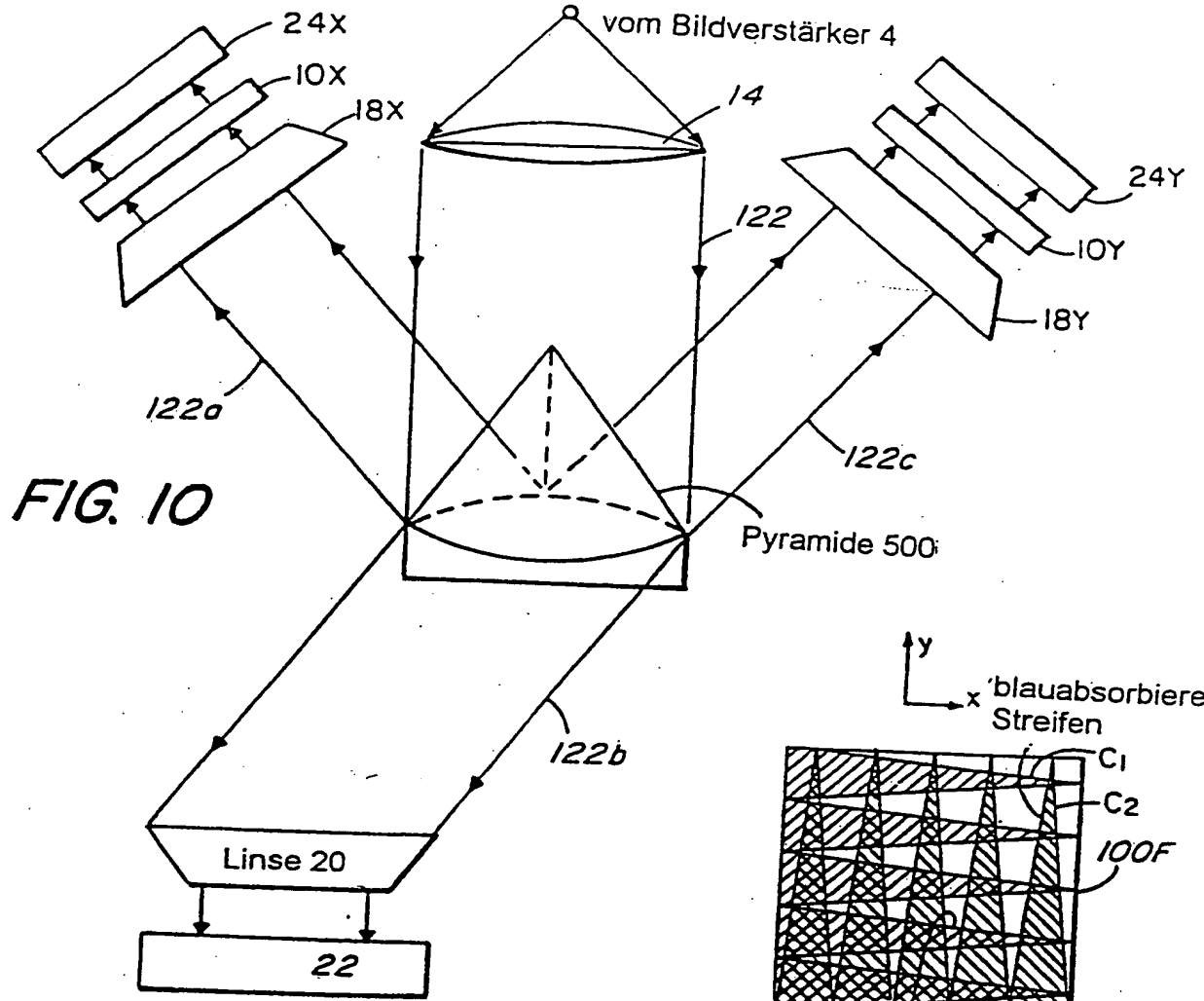


FIG. 8

**FIG. 9A**





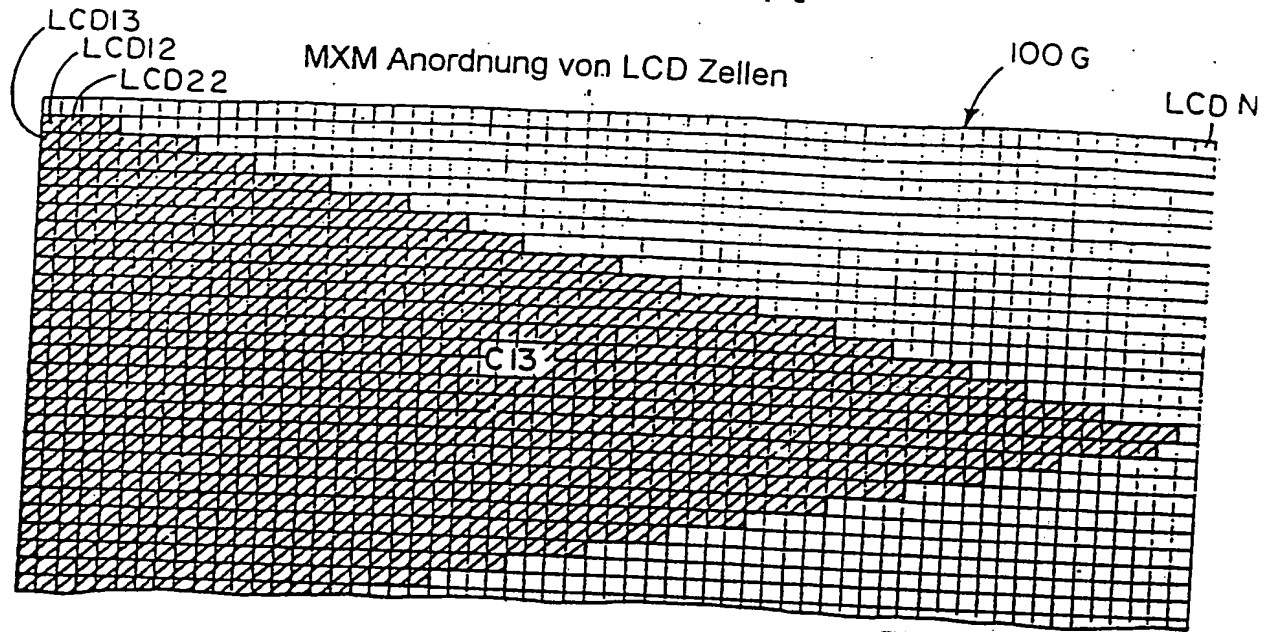


FIG. 13

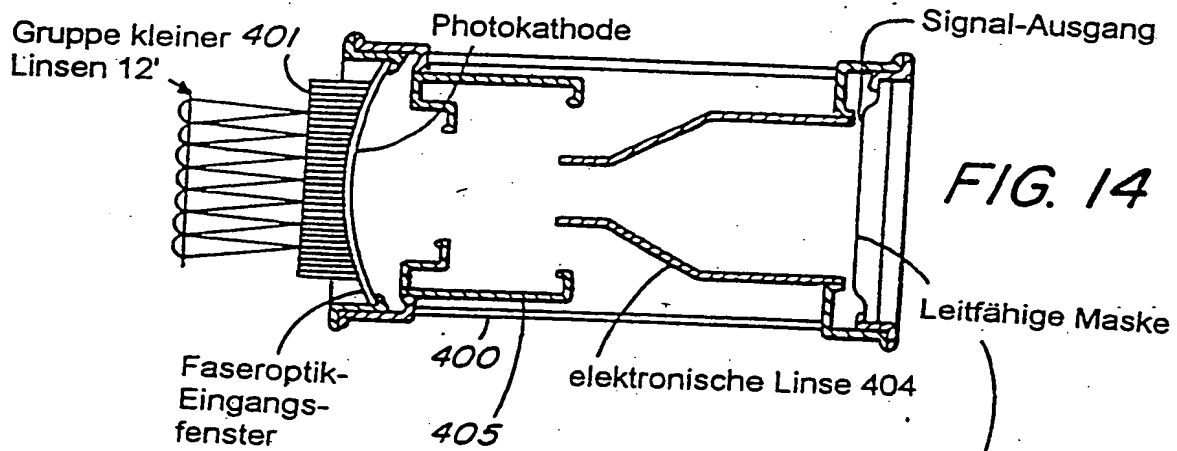
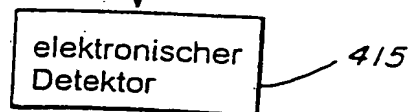
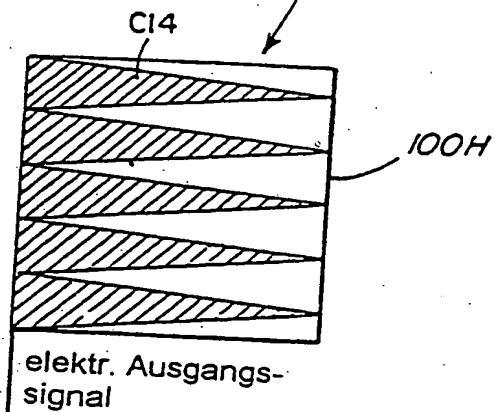


FIG. 14

FIG. 15



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☐ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☒ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**